

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.01.004

一种稻秸秆泥皮护坡材料及抗冲刷试验研究

张红日^{1,2}, 王桂尧¹, 沙琳川¹

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广西交通科学研究院, 广西 南宁 530007)

摘要: 基于土质边坡的雨水冲刷及生态防护的根系护坡原理, 提出了一种基于稻秸秆泥皮护坡新方法。采用物理力学试验方法, 研究了稻秸加筋对泥皮性质的影响, 分析了稻秸秆添加前后泥皮的干密度、渗透性、崩解性、干缩抗裂性等参数变化。在此基础上, 对采用稻秸秆泥皮护坡材料的边坡进行了室内强降雨冲刷模拟试验, 通过对比分析裸坡、纯泥皮护坡、稻秸秆泥皮护坡冲刷试验的结果, 研究了稻秸秆泥皮护坡的抗冲刷效果; 通过对不同稻秸秆含量配比、不同稻秸秆长度、不同含水量稻秸秆泥皮护坡材料的试验, 研究了该材料抗冲刷性能影响因素。结果表明: 稻秸秆泥皮材料具有干密度大、抗渗能力强、抗崩解和抗干缩开裂效果明显等特性; 稻秸秆泥皮护坡能显著提高路基边坡的抗强降雨冲刷能力, 最经济合理的配比指标为稻秸秆含量 20 kg/m^3 左右, 长度 $7.5 \sim 10 \text{ cm}$, 泥皮含水量 18% 左右抗冲刷能力最强。

关键词: 道路工程; 稻秸秆泥皮; 降雨冲刷; 试验研究; 生态防护

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2017) 01-0024-08

Experimental Study on a Rice-straw Mud Material for Slope Protection and Anti Erosion

ZHANG Hong-ri^{1,2}, WANG Gui-yao¹, SHA Lin-chuan¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan 410114, China;
2. Guangxi Transportation Research Institute, Nanning Guangxi 530007, China)

Abstract: Based on the rainfall erosion and the fixing soil principle of root system in slope ecological protection, a new method for slope protection with rice straw mud is put forward. Through the test of physical and mechanical properties, the effect of rice straw on mud character is studied, the parameter changes of dry density, permeability, disintegration, and dry shrinkage crack resistance of mud before and after adding the rice straw is analysed. On this basis, the strong rainfall indoor simulation test on the slope using rice straw mud slope protection material is carried out. Through the comparative analysis of rainfall erosion simulation test results of bare slope, pure fluid mud on slope and rice straw mud on slope, the anti-erosion ability of straw rice mud slope protection is studied. Though the tests on the rice straw mud slope protection materials with different rice straw contents, different rice straw lengths and different water contents, the influencing factors on anti-erosion ability of this material are studied. The result shows that (1) the rice straw mud material has the characteristics of high dry density, strong anti permeability, strong anti disintegration and obvious anti dry shrinkage and cracking ability; (2) the rice straw mud slope protection material can significantly improve the anti heavy rainfall erosion ability of subgrade slope, the most economical and reasonable ratio index is rice straw content should be 20 kg/m^3 , the length of rice straw should be $7.5 \sim 10 \text{ cm}$, and the water content should be 18% for the best anti erosion ability.

Key words: road engineering; rice straw mud; experimental study; rainfall erosion; ecological protection

收稿日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178063, 51578082); 广西交通科学研究院科技项目 (KJ2014-014)

作者简介: 张红日 (1983-), 男, 广西鹿寨人, 博士研究生, 高级工程师. (18778057258@139.com)

0 引言

南方雨季的强降雨对土体不断冲蚀造成边坡坍塌是工程常见病害之一, 尤其是新开挖边坡更为明显。植物防护不但能美化环境、改善生态平衡, 还对提高坡面抗冲刷能力和边坡稳定具有重要作用^[1-5]。当坡面种草植树后, 植物根系犹如加筋条带不断深入土层, 将坡体表面一定厚度的土体充分固化, 减少地表流水的浸蚀切割破坏^[6-16]。然而, 在边坡开挖或填筑施工刚完成的 1~2 a 内的人工边坡, 尚未生长充分的短小植物根系和稀疏叶片, 无法形成植被覆盖和根系固化作用, 坡面土体易受雨水冲刷和入渗影响而发生边坡滑塌破坏^[17-19], 因此, 必须着重研究人工边坡形成初期的绿化防护问题。目前边坡植被绿化方法较多, 并取得了一定的效果^[20], 但仍存在不足。人工播种技术、液压喷播技术成本低廉, 但坡面生态防护恢复需要时间长, 前期受雨水冲刷及风吹日晒影响, 在较高边坡效果不佳; 移栽技术, 植被成活率高, 绿化速度快, 但需预先栽培, 并且二次运输及施工成本高; 植生袋、厚层基材喷播技术虽比较成熟, 且恢复效果好, 但未能解决暴雨冲刷入渗问题, 且成本较高; 三维网在暴雨冲刷下常会整片剥离原坡面, 且塑料制品对环境存在污染; 土工格室, 抗冲刷能力强, 但成本高, 后期环境效应差。本文提出一种新型生态护坡方法, 不但能即时发挥抗冲刷作用, 又能促进坡面植被快速生长, 同时生态环保。

在农村, 稻秸秆大部分都被废弃, 并且普遍采用焚烧方法处置, 对空气环境造成严重污染。鉴于废物利用和生态环保的理念, 本文根据植物根系加筋土体原理, 提出一种利用稻秸秆进行边坡生态防护的稻秸秆泥皮护坡方法, 该方法预先将稻秸秆与黏土拌和, 然后摊铺于坡面, 形成一个泥皮结构, 稻秸秆发挥植物根系作用, 而泥皮流塑变为干硬状态在坡面形成了一个有效的保护壳, 不但能使坡面土壤具有一定的固化强度, 而且又适合稻秸秆植被生长, 同时施工简单、造价低廉, 能够抵抗强降雨的冲刷。

1 稻秸秆泥皮护坡方法简介

稻秸秆泥皮材料主要由黏土和废弃稻秸秆组成。施工方法为将黏土加水拌和, 并将裁剪后的稻秸秆添加到黏土中拌和均匀, 拌和物呈流塑状, 按照一定厚度均匀喷施(摊铺)到边坡坡面, 然后抹平坡面并喷播种子, 最后覆盖防护土工膜即可完成边坡

防护施工。将黏土加水搅拌成流塑状能排出土体内部气体, 干燥后形成一层坚硬密实的泥皮。在搅拌中加入的稻秸秆在泥皮中纵横交错, 起到与植被根系类似的加筋土作用, 将土体相互联结成为整体, 加强了泥皮整体性能。另外, 泥皮表层植被生长过程中, 稻秸秆自动腐化分解, 转为植被吸收的养分, 有效促进植被生长, 当植被充分生长茂盛后, 发达根系填充到稻秸秆腐化形成的空隙, 最终形成有效的植被的生态防护。稻秸秆泥皮护坡方法具有植被绿化功能良好、造价低廉、符合生态环保理念, 并能大幅减少或避免强降雨对坡面冲刷的优点。

2 稻秸秆泥皮材料物理力学性能

2.1 稻秸秆泥皮材料室内制作

将稻秸秆裁剪成 7.5 cm 长度, 按稻秸秆含量 20 kg/m³ 的配比, 掺入黏土中加水调制流塑状, 搅拌过程中不断添加稻秸秆直至所有稻秸秆都充分与黏土拌和, 最后按 10 cm 厚度均匀摊铺于试验边坡坡面上。

试验所用黏土的物理指标如表 1 所示, 要求含砾量小, 黏性大。

表 1 黏土物理指标
Tab. 1 Physical indexes of clay

名称	液限/%	塑限/%	塑性指数	最佳含水量/%	最大干密度/(kg·m ⁻³)
黏土	38.1	18.9	19.2	18.1	1.75 × 10 ³

2.2 稻秸秆泥皮材料的物理力学特性试验及分析

2.2.1 干密度试验

对稻秸秆泥皮和纯泥皮分别进行不同含水量配比的干缩过程干密度变化测试试验, 并对同一土样采用标准轻型击实试验(分 3 层击实, 每层 25 击)求得不同含水量土样的干密度, 其结果如图 1 所示。

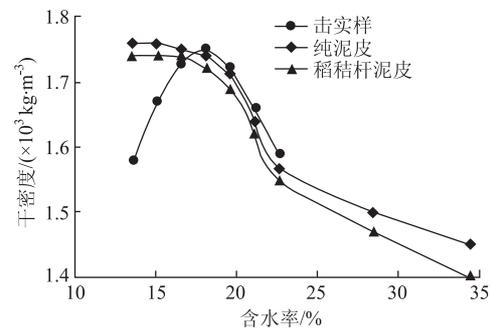


图 1 干密度与含水量关系曲线

Fig. 1 Relationship between dry density and water content

从图 1 可见, 击实土样的干密度与含水量呈抛物线关系, 含水量 18.1% 对应的干密度最大。与击

实土样不一样,纯泥皮和稻秸秆泥皮土在含水量逐渐减小的干缩过程中,干密度不断增大,但含水量减小到18.1%后增幅很小,总体呈半抛物线状。对比击实土样、纯泥皮、稻秸秆泥皮三者干密度,在含水量大于最优含水量18.1%时,纯泥皮、稻秸秆泥皮的干密度略小于击实试验得到的干密度;但含水量小于18.1%时,纯泥皮、稻秸秆泥皮的干密度在干缩过程中继续增大,明显大于击实试验得到的干密度,这说明在土粒加水充分拌和后,土粒自然干缩密实,土体孔隙率很小,所得到的干密度很大,在小于最优含水量时,其干密度大于击实土样。相对于纯泥皮,稻秸秆泥皮干密度略小,其原因是稻秸秆自身密度小于纯土颗粒密度,同时稻秸秆的加筋牵拉作用有效减小泥皮的收缩。

2.2.2 渗透性试验

干缩后的泥皮结构坚硬,环刀取样困难,无法适用常规渗透试验。为了测试泥皮结构的渗透性能,本文设计了简易渗透试验方案:取泥皮土样制作成方形砖试样,在中间植入环刀并用蜡封闭四周,在环刀中保持1 cm水柱高度的渗透水头,在底部垫一层试纸,当确定试纸湿润时,即可得到整个泥皮层厚的渗透时间。

方形砖试样尺寸为30 cm × 30 cm × 10 cm,30 cm的长宽能保证水从环刀渗透到底部的时间小于厚度方向的渗透时间。通过不同击实试验所得的击实土样以及纯泥皮、生长植被后的稻秸秆泥皮3种材料制作成的试样进行渗透试验,得到与泥皮对比分析的试验结果如表2所示。生长植被后的稻秸秆泥皮如图2所示。

表2 试验结果
Tab.2 Test result

材料	击实黏土			纯泥皮	稻秸秆泥皮	稻秸秆泥皮植被
	15	18.1	21	18	18.2	18.5
含水量/%	15	18.1	21	18	18.2	18.5
渗透时间/h	1.5	10	8	21	28	32

从表2可以看出,15%含水量击实黏土的渗透时间为1.5 h,而最优含水量击实黏土需要10 h,说明密实度能大大提高土体的抗渗性能,含水量在21%时为8 h,说明土体饱和度亦能影响土体渗透时间。相对于击实黏土,泥皮结构的渗透时间明显提高,达到21 h,主要是泥皮在拌和过程中空气排尽,颗粒合理重新分布,干结后密实度明显提高,土体空隙较小。稻秸秆泥皮抗渗时间比纯泥皮多7 h,稻秸秆在泥皮中纵横交错,起到类似植被根系的作用,



图2 稻秸秆泥皮植被抗渗试验照片

Fig.2 Photo of anti-permeability experiment on vegetation of rice straw and mud-cake

将土体相互联结成为整体,加强了泥皮整体性能,同时,稻秸秆具有的保水储水能力,使稻秸秆泥皮的抗渗能力得到提升。植被生长后稻秸秆泥皮经过32 h才渗穿,比稻秸秆泥皮结构多了4 h,说明根系生长有效填充土体的内部空隙,增大了水体的渗径,延长渗穿时间,另外根系的吸水性能亦是延长渗穿时间的一个重要因素。

2.2.3 崩解性

一种良好的护坡材料,其在降雨饱水以及干湿循环情况下依然具备抵抗雨水冲刷能力,则要求材料结构具备一定的抗崩解性。试验方法^[21]为:将制作好的稻秸秆泥皮材料放置于静水中,观察其崩解过程。干湿循环崩解试验测试为:将试样放在水(室内温度23~24℃,室内玻璃皿水温20~21℃)中浸泡1 h,然后将试样取出在阳光下烘晒(室外温度28~32℃)1 h,再放入水中浸泡1 h后观察其崩解性作为一次干湿循环。为对比分析稻秸秆泥皮的崩解性,分别对击实样(含水量18.1%,压实度95%)、纯泥皮(含水量17.9%)、稻秸秆泥皮(稻秸秆含量20 kg/m³,含水量18.0%)3种材料进行对比分析。试验结果如表3所示。

从上述试验结果看出,击实土样在静水连续浸泡24 h崩解1/2,1次干湿循环即完全崩解,说明颗粒之间的黏结力很弱,干湿循环后不具备抗崩解能力。纯泥皮结构在静水连续浸泡24 h崩解1/4,4次干湿循环后完全崩解,崩解后部分呈片状,说明经过搅拌干硬后的泥皮抗崩解能力明显提高;稻秸秆泥皮在静水连续浸泡24 h依然未崩解,只有少量边界颗粒脱落,经过5次干湿循环后崩解量为1/2,崩解呈团状,并且崩解体之间仍有稻秸秆联接,并未完全分离,说明稻秸秆能有效提高泥皮结构的抗崩解性能。

2.2.4 干缩开裂特性

将泥皮材料装入到直径10 cm、高10 cm的PVC管中,在阳光照射下自然风干,通过测量试样的干

表 3 崩解试验结果

Tab. 3 Disintegration test result

浸水时间 (循环次数)	击实土样	纯泥皮	稻秸秆泥皮
30 min (连续)	未崩解, 局部土颗粒散落	未崩解	未崩解
1 h (连续)	未崩解, 散落土颗粒增多	未崩解	未崩解
3 h (连续)	1/4 崩解, 土颗粒散落	未崩解, 局部土颗粒散落	未崩解
6 h (连续)	1/3 崩解, 土颗粒扇形坍塌	未崩解, 散落土颗粒增多	未崩解, 少部分土颗粒分离
24 h (连续)	1/2 崩解, 土颗粒扇形坍塌	1/4 崩解, 崩解呈片状及颗粒状	未崩解, 散落土颗粒增多
2 h (1 次)	1/2 崩解, 土颗粒扇形坍塌	未崩解, 局部土颗粒散落	未崩解
3 h (2 次)	完全崩解	1/4 崩解, 崩解呈片状及颗粒状	未崩解, 局部土颗粒散落
4 h (3 次)	无法试验	1/2 崩解, 局部土颗粒散落	1/4 崩解, 崩解呈团状及颗粒状
5 h (4 次)	无法试验	完全崩解, 呈片状及颗粒状	1/3 崩解, 崩解呈团状及颗粒状
6 h (5 次)	无法试验	无法试验	1/2 崩解, 崩解呈团状及颗粒状

缩深度确定材料干缩性能, 再通过测量试样表面裂缝尺寸确定材料开裂特性。为了对比分析, 本文采用稻秸秆含量 0, 5, 10, 20, 30 kg/m⁻³, 30 d 不同稻秸秆含量泥皮的干缩开裂情况如图 3 所示。其对比分析测试结果如图 4 和表 4 所示。

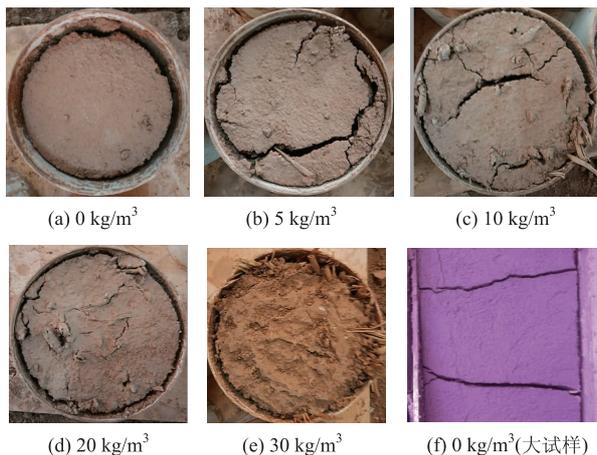


图 3 稻秸秆泥皮 30 d 干缩照片

Fig. 3 Photo of 30 d dry shrinkage of rice straw mud-cake

从图 4 可知, 在前 15 d 干缩深度迅速增大, 15 d 后干缩深度增速降低, 30 d 后干缩深度趋于稳定。0 kg/m³ 稻秸秆含量 (纯泥皮) 30 d 的干缩深度

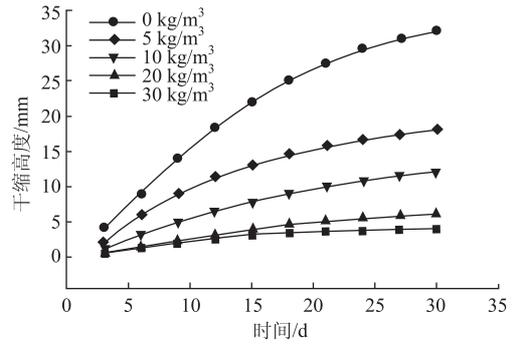


图 4 稻秸秆泥皮随时间的干缩开裂深度

Fig. 4 Dry shrinkage and cracking depth of rice straw mud-cake varying with time

最大, 为 32 mm, 5 kg/m³ 的干缩深度为 19 mm, 而 30 kg/m³ 的干缩深度最小, 仅为 4 mm, 不同稻秸秆含量泥皮结构的干缩深度对比发现, 稻秸秆含量愈大, 干缩深度愈小。

表 4 裂缝 30 d 试验统计结果

Tab. 4 Statistical result of 30 d cracking test

稻秸秆含量/ (kg · m ⁻³)	总长/mm	条数	最宽/mm	最长/mm	最深/mm
0	0	0	0	0	0
5	253	5	9	163	19
10	142	6	6	72	12
20	41	3	2	33	4
30	24	2	1	15	2
0 (大试样)	1 155	2	25	550	100

从表 4 稻秸秆泥皮 30 d 试验裂缝统计结果可以看出, 除纯泥皮未出现裂缝外, 随着时间的推移, 图 3 (b) ~ (e) 中, 裂缝长度、深度、宽度均增大, 多条小裂缝发展融合为大裂缝, 尤其 5 kg/m³ 含量的稻秸秆泥皮结构, 30 d 后多条裂缝形成了一条贯通裂缝; 图 3 (a) 中纯泥皮未出现裂缝, 但是在 0.5 m × 1 m 大尺寸试样 (图 3 (f)) 时, 得到的结果却不相同, 在长度方向出现两条贯穿裂缝, 裂缝宽度最宽达 25 mm, 裂缝深度贯穿整个泥皮厚度 (100 mm), 其主要原因还是尺寸效应, 当纯泥皮结构尺寸较小时, 即使泥皮结构强烈收缩, 由于内部无稻秸秆干扰, 反而形成一个团块, 不易开裂, 而大试样纯泥皮结构无法达到收缩一致, 产生极大的收缩应力, 而内部缺乏稻秸秆加筋作用, 直接造成了纯泥皮结构的断裂。总体上, 稻秸秆含量增大, 无论是泥皮的总裂缝长度还是最大裂缝宽度, 均明显减小。

从以上分析可以看出, 稻秸秆不仅能有效减少泥皮的干缩量, 而且还能有效减少裂缝扩展数量、

宽度、长度。因此,稻秸秆起加筋固化泥皮作用,能有效减少干缩裂缝发展。

3 稻秸秆泥皮护坡的强降雨冲刷模拟试验结果及分析

3.1 试验方法

为了测试泥皮护坡的抗降雨冲刷能力,本文设计的模拟降雨冲刷试验装置如图5所示。将 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 箱子 0.2 m 高度填满黏土并击实,最后 0.1 m 高度采用泥皮进行覆盖并抹平,然后将箱子按照1:1的坡率立于支架上。待边坡泥皮风干(含水量约18%)后,通过水龙头引水,转子流量计与水表控制水量大小,利用花洒面积换算成降雨量,通过花洒对边坡进行冲刷,并通过收集装置收集泥沙冲刷量。

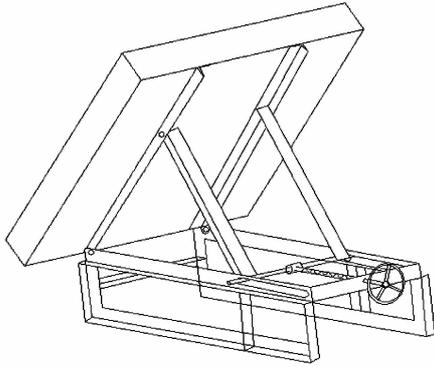


图5 边坡模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of slope model

3.2 边坡降雨冲刷试验结果及分析

为了对比分析稻秸秆泥皮护坡的冲刷性能,试验采用无坡面防护的裸坡、纯泥皮护坡、含量 20 kg/m^3 的稻秸秆泥皮护坡进行强降雨冲刷模拟试验。边坡坡率1:1,模拟特大暴雨的雨强 100 mm/h 。由于初始冲刷量较大,故冲刷开始的第1 h内每15 min测量一次冲刷量,1 h以后每小时测量一次,6 h后测量间隔逐渐加大。

试验冲刷量测试结果如图6所示。结果表明,开始15 min 3种材料的累积冲刷量分别为 12.8×10^{-3} , 5.3×10^{-3} , $4 \times 10^{-3}\text{ m}^3$,裸坡冲刷量最大,而稻秸秆泥皮护坡冲刷量最小。当冲刷3 h 12 min后裸坡开始滑移破坏,此时累积冲刷量为 $53.5 \times 10^{-3}\text{ m}^3$ 。纯泥皮护坡则在冲刷24 h后发生滑移破坏,此时累积冲刷量为 $13.8 \times 10^{-3}\text{ m}^3$ 。稻秸秆泥皮护坡72 h的冲刷量仅为 $9.0 \times 10^{-3}\text{ m}^3$,未产生滑动迹象,并且随冲刷继续,冲刷量只是略微增大,冲刷后的水流清澈,说明稻秸秆泥皮能极大提高边坡抗冲刷能力,连续3 d降雨冲刷依然保持边坡稳定。

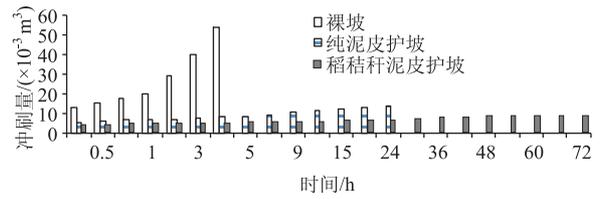


图6 各种材料的冲刷量与时间关系图

Fig. 6 Relationship between erosion amount and time for different materials

从图7所示的边坡破坏形态并结合冲刷过程分析,裸坡的冲刷量很大,随着土体流失,尤其边坡中下部的土体流失,使得部分坡面产生镂空,边坡坡率变陡,最终导致边坡滑塌。纯泥皮护坡的泥皮干结变硬后,形成的壳体能有效减缓坡面土体的雨水冲刷,使纯泥皮护坡比裸坡能大幅提高抗冲刷性能,但由于泥皮干缩固结过程中收缩变形产生的两条土体贯通裂缝,在雨水冲刷过程中,雨水不断沿着裂缝薄弱环节冲蚀并且入渗,同时泥皮结构没有稻秸秆的加筋作用,泥皮吸水饱和后强度明显降低,雨水的溅蚀和冲刷持续作用,不断瓦解原来相互粘结的黏土颗粒,最终导致边坡失稳破坏。稻秸秆泥皮护坡的泥皮干结后与土中稻秸秆形成了一个有机整体,稻秸秆保水作用使混合料水分变化幅度减缓,同时稻秸秆的加筋牵拉作用,使得坡面泥皮不会出现大型贯通裂缝,只有局部浅层裂纹,裂纹深度不超过 1.0 cm 。由于浅层 1.0 cm 左右裂纹的存在,使前36 h稻秸秆泥皮护坡累积冲刷量达到 $7.9 \times 10^{-3}\text{ m}^3$,但失去浅层泥皮黏土后,裸露坡面的稻秸秆(图7(c)所示)类似于坡面植被,另一端坡面黏土中的稻秸秆则类似于植被根系的牵拉作用,部分脱离土体后与未脱离稻秸秆的相互缠绕,形成了一个由稻秸秆为面层的有机保护罩(图7(c)所示)。当雨水冲刷坡面时,这个保护罩消耗了雨水大部分动能,雨水从罩面上流走,避免了对坡面黏土的进一步冲刷,所以36~72 h的冲刷量只有 $1.1 \times 10^{-3}\text{ m}^3$,最终试验72 h的累积冲刷量仅为 $9.0 \times 10^{-3}\text{ m}^3$,并且坡面稳定。这表明稻秸秆泥皮护坡能有效保护边坡土体不受雨水冲刷侵蚀。

4 稻秸秆泥皮护坡材料参数影响冲刷的试验研究

4.1 稻秸秆含量对降雨冲刷的影响

为分析不同稻秸秆含量的泥皮抗冲刷能力,通过对稻秸秆含量分别为 $0, 10, 20\text{ kg/m}^3$ 和 30 kg/m^3 的稻秸秆泥皮护坡进行降雨冲刷试验。边坡坡率以

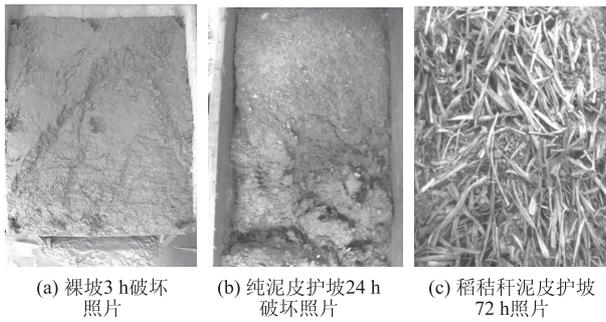


图 7 各种材料边坡的冲刷试验照片

Fig. 7 Photos of erosion test on various material slopes

及降雨情况与 3.2 相同, 稻秸秆泥皮结构含水量约为 18%。其试验结果如图 8 所示。

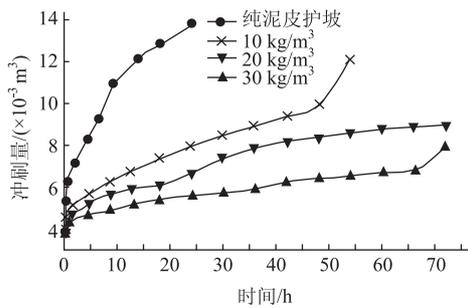


图 8 不同稻秸秆含量的冲刷量与时间关系图

Fig. 8 Relationship between erosion quantity and time in different rice straw contents

从冲刷结果可以看出, 纯泥皮护坡和稻秸秆含量 10 kg/m^3 的稻秸秆泥皮护坡分别在 24 h 和 55 h 后产生滑坡破坏, 破坏前冲蚀量分别为 $13.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 和 $12.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, 而稻秸秆含量 20, 30 kg/m^3 的稻秸秆泥皮护坡在冲刷 72 h 后仍没有破坏, 累计冲蚀量分别为 $9.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 和 $7.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。可见稻秸秆含量越大, 抵抗强降雨冲刷效果越明显。其原因是稻秸秆加固层能有效抵抗雨滴溅蚀, 尤其是浅层土体被冲刷后, 裸露的稻秸秆直接形成一层保护罩, 稻秸秆含量大, 保护罩的厚度和密度相对更大, 抵抗雨水冲蚀效果就愈明显。含量 30 kg/m^3 泥皮护坡冲蚀量在 66 h 后陡增, 其原因是由于坡脚汇水量大, 稻秸秆含量过大而土体过少, 稻秸秆黏结力不足导致边坡底部稻秸秆整体被雨水冲蚀带走, 局部失稳破坏, 此种情况会随着稻秸秆含量增多而愈加明显, 另外稻秸秆含量太高, 拌和工作能耗大, 搅拌不充分, 机械施工会在搅拌时产生卡死或者在喷施中产生堵塞等不利情况, 因此建议稻秸秆含量在 20 kg/m^3 为宜。

4.2 稻秸秆长度对降雨冲刷的影响

稻秸秆是加筋材料, 其长度直接会影响泥皮的

抗冲刷能力, 本文对稻秸秆长度 2.5, 5, 7.5, 10 cm 4 种长度进行了试验, 边坡坡率以及降雨情况与 3.2 相同, 稻秸秆含量 20 kg/m^3 , 稻秸秆泥皮结构含水量约为 18%, 其结果如图 9 所示。

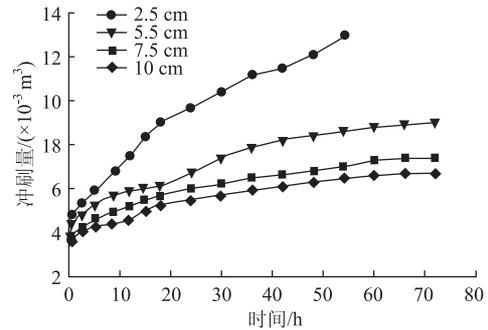


图 9 不同稻秸秆长度的冲刷量与时间关系图

Fig. 9 Relationship between erosion quantity and time in different rice straw lengths

从图 9 可见, 稻秸秆长度 2.5 cm 的泥皮护坡在冲刷 55 h 后发生失稳滑动, 54 h 的冲刷量为 $12.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, 稻秸秆长度分别为 5, 7.5 cm 和 10 cm 的泥皮护坡经过 72 h 仍没有滑动迹象, 冲刷量亦较小, 总体上泥皮冲刷量随稻秸秆长度增加而减小。出现以上现象的原因是稻秸秆长度增加, 稻秸秆与土体有效黏结长度亦增加, 因此稻秸秆抗拔力提高, 而过短的稻秸秆易被降雨滴溅冲刷脱离土体导致抗拔力失效。由图 8 亦可发现, 长度 7.5 cm 和 10 cm 的稻秸秆泥皮冲刷量较为接近, 稻秸秆长度提高到 7.5 cm 后, 满足了雨强冲刷力的临界要求, 此时单纯增加稻秸秆长度, 提高抗冲刷效果就不那么明显了。另外, 考虑稻秸秆长度增加, 需要增加额外的能耗和施工难度, 因此建议采用 7.5 ~ 10 cm 稻秸秆长度为宜。

4.3 稻秸秆泥皮含水量对降雨冲刷的影响

拌和完毕的泥皮呈流塑状, 抗冲刷能力差, 随着含水量降低, 泥皮干结硬化, 与稻秸秆紧密咬合, 抗冲刷能力逐步提高。边坡坡率以及降雨情况与 3.2 相同。不同含水量状态下的稻秸秆泥皮冲刷试验结果如图 10 所示。

从图 10 可见, 当含水量为 25% 和 21% 时, 泥皮处于可塑状态, 尚未干结硬化形成一个整体, 土体抗滴溅和冲刷能力弱, 在强降雨分别冲刷 10 h 和 31 h 后滑坡破坏, 其冲刷量分别为 $15.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 和 $12.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。但随着含水量减小, 泥皮干缩密实, 稻秸秆包裹在土体中不易拔出, 浅层冲刷后土体被上部稻秸秆所覆盖, 从而使含水量为 18% 泥皮的抗冲刷能力明显提高。

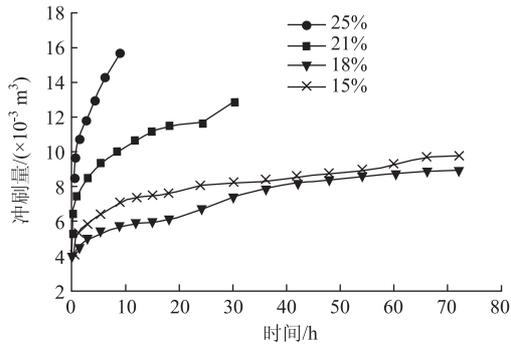


图10 不同泥皮含水量的冲刷量与时间关系图

Fig. 10 Relationship between erosion quantity and time in different water contents of mud-cake

对比18%和15%含水量的泥皮冲刷情况,15%含水量泥皮的冲刷量略大于含水量18%泥皮的冲刷量,其原因是干结的稻秸秆泥皮均出现了较多裂纹,但由于稻秸秆的牵拉加筋作用,使这些裂纹并未贯通,但含水量15%泥皮的裂纹数量和规模明显大于含水量18%的泥皮,当雨水冲刷时,这些裂纹是泥皮最容易蚀毁部位,由此出现15%含水量的稻秸秆泥皮冲刷量略大于18%含水量的现象。由此可见,抗冲刷能力最好的泥皮含水量为18%左右。

5 结论

(1) 稻秸秆泥皮干缩过程的含水量降低而干密度增加,小于最优含水量时稻秸秆泥皮的干密度大于击实土的干密度,试验表明干缩后的稻秸秆泥皮具有很高的密实度。

(2) 泥皮自然干缩密实,使泥皮的抗渗性能远优于击实土样,而稻秸秆的联结作用和保水储水性能使泥皮的抗渗性能提高,植被根系生长填充泥皮空隙使其抗渗性进一步提高,因此采用泥皮护坡能大大减少坡面的雨水入渗。

(3) 自然干硬泥皮能提高土体的抗崩解性,而掺入稻秸秆则能大幅度地提高泥皮的抗崩解性;稻秸秆含量增多,稻秸秆泥皮干缩量、开裂裂缝数量和规模等均大幅减小。稻秸秆泥皮的牵拉加筋作用能有效提高泥皮的抗崩解、干缩和开裂性能。

(4) 强降雨冲刷试验结果表明,稻秸秆泥皮护坡能大幅提高边坡的抗冲刷能力;比较分析裸露边坡、泥皮护坡、稻秸秆泥皮护坡以及不同稻秸秆含量配比和不同稻秸秆长度泥皮护坡的冲刷试验结果认为,最经济合理的配比指标为稻秸秆含量 20 kg/m^3 、长度 $7.5 \sim 10 \text{ cm}$,泥皮含水量18%左右,抗冲刷能力最强。

参考文献:

References:

- [1] 汪益敏. 路基边坡工程理论与实践发展综述 [J]. 中外公路, 2001, 21 (6): 31-35.
WANG Yi-min. Review of Subgrade Slope Engineering Theories and Practices [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2001, 21 (6): 31-35.
- [2] 田国行, 杨晓明, 杨春. 高速公路边坡土壤侵蚀研究进展 [J]. 中外公路, 2008, 28 (6): 21-28.
TIAN Guo-xing, YANG Xiao-ming, YANG Chun. Research Progress on Erosion of Expressway Slope Soil [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28 (6): 21-28.
- [3] 刘志明, 李建中, 张可能, 等. 公路边坡工程中的植物生态防护技术 [J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1 (7): 47-50.
LIU Zhi-ming, LI Jian-zhong, ZHANG Ke-neng, et al. Technology of Biological Protection in the Slope Engineering of the Highway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1 (7): 47-50.
- [4] 周利民, 林新明, 邓岚. 水土保持边坡固化植草技术研究 [J]. 水土保持通报, 2006, 26 (6): 92-93, 106.
ZHOU Li-min, LIN Xin-ming, DENG Lan. Solidification Seeding Technique for Slope Stabilization in Soil and Water Conservation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26 (6): 92-93, 106.
- [5] 伍谦. 高速公路边坡植草护坡的根固效应研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31 (11): 106-109.
WU Qian. Research on Reinforcement Mechanisms of Expressway Side Slope Protection with Greensward [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31 (11): 106-109.
- [6] 王协康, 方铎. 植被措施控制水土流失机理及其效益研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2000, 32 (2): 13-16.
WANG Xie-kang, FANG Duo. Study on the Principles and Benefits of Plants to Control Water and Soil Losses [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2000, 32 (2): 13-16.
- [7] 赵明华, 蒋德松, 陈昌富, 等. 岩质边坡生态防护现场及室内抗冲刷试验研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 31 (5): 77-81.
ZHAO Ming-hua, JIANG De-song, CHEN Chang-fu, et al. Research on On-the-spot and Indoor Washing-out Tests of Ecological Protection of Rocky Slopes [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2004, 31

- (5): 77-81.
- [8] 王文生, 杨晓华, 谢永利. 公路边坡植物的护坡机理 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25 (4): 26-30.
WANG Wen-sheng, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li. Mechanism of Biotechnical Protection for Highway Slope [J]. Journal of Chang an University: Natural Science Edition, 2005, 25 (4): 26-30.
- [9] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究 [J]. 水土保持研究, 2006, 13 (1): 62-65.
CHEN Hong, YAN Chuan-sheng, LI Jian-qing, et al. An Experimental Study on Mechanic Performance and Mechanism of Soil-reinforcement by Herb Root System [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13 (1): 62-65.
- [10] 戴艳辉, 王桂尧. 几种生态固化边坡的冲刷试验研究 [J]. 中外公路, 2013, 33 (6): 16-19.
DAI Yan-hui, WANG Gui-yao. Experimental Study of Several Eco-cured Slope Erosion [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33 (6): 16-19.
- [11] 毛伶俐. 生态护坡中植被根系的力学分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
MAO Ling-li. Mechanical Analysis of Vegetation Roots in Ecological Slope Protection [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [12] 王帅. 不同配比深、浅根系植物对边坡抗冲、抗剪性能影响试验 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (12): 39-44.
WANG Shuai. Experiment on Influence of Different Proportions of Deep-root and Shallow-root Plants on Anti-erosion and Shear Performance of Slope Soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (12): 39-44.
- [13] 蒙仲举, 孙铁军, 高永, 等. 草地雀麦坡地水土保持作用的研究 [J]. 水土保持通报, 2008, 28 (4): 86-89.
MENG Zhong-ju, SUN Tie-jun, GAO Yong, et al. Effects of Soil and Water Conservation by Meadow Brome Planted on a Sloping Land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28 (4): 86-89.
- [14] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (5): 40-46.
ZHU Hai-li, HU Xia-song, MAO Xiao-qing, et al. Relationship between Mechanical Characteristics and Anatomical Structures of Slope Protection Plant Root [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25 (5): 40-46.
- [15] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (增2): 3445-3452.
ZHU Hai-li, HU Xia-song, MAO Xiao-qing, et al. Study on Mechanical Characteristics of Shrub Roots for Slope Protection in Loess Area of Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (S2): 3445-3452.
- [16] 周自玮, 孟广涛, 毛熔, 等. 三种多年生牧草保水能力及土壤改良作用的研究 [J]. 中国草地学报, 2008, 30 (1): 66-71.
ZHOU Zi-wei, MENG Guang-tao, MAO Rong, et al. Study on Ability of Water Conservation and Soil Improvement of Three Perennial Forage Species [J]. Chinese Journal of Grassland, 2008, 30 (1): 66-71.
- [17] 张永杰, 王桂尧, 王玲, 等. 路堑边坡植被防护固土效果室内外试验 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2012, 9 (3): 9-14.
ZHANG Yong-jie, WANG Gui-yao, WANG Ling, et al. Solidify Effect of Cut Slope Ecology Protection with Indoor and Outdoor Tests [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 9 (3): 9-14.
- [18] 刘礼领, 殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (4): 1061-1066.
LIU Li-ling, YING Kun-long. Analysis of Rainfall Infiltration Mechanism of Rainstorm Landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (4): 1061-1066.
- [19] 付宏渊, 曾铃, 王桂尧, 等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (8): 2359-2365.
FU Hong-yuan, ZENG Ling, WANG Gui-yao, et al. Stability Analysis of Soft Rock Slope under Rainfall Infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (8): 2359-2365.
- [20] 郝岩松, 王国兵, 万福绪. 我国高速公路生态边坡的建设及生态评价 [J]. 水土保持研究, 2007, 14 (4): 257-262.
HAO Yan-song, WANG Guo-bing, WAN Fu-xu. The Evaluation and Construction of Ecological Slope in China's Highway [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14 (4): 257-262.
- [21] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (增2): 4173-4179.
WU Dao-xiang, LIU Hong-jie, WANG Guo-qiang. Laboratory Experimental Study of Slaking Characteristics of Red-bed Soft Rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S2): 4173-4179.